

**BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**

#2

**PRIORITY  
DOCUMENT**SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

REC'D 21 JUN 2000

WIPO

PCT

4

**Bescheinigung**

EP00/04167

Die Deutsche Telekom AG in Bonn/Deutschland hat eine Patentanmeldung unter der  
Bezeichnung

"Mikrominiaturisierter freier Elektronenlaser"

am 25. Mai 1999 beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereicht.

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprüng-  
lichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

Die Anmeldung hat im Deutschen Patent- und Markenamt vorläufig die Symbole  
H 01 S, H 01 J und G 01 N der Internationalen Patentklassifikation erhalten.

München, den 7. April 2000

**Deutsches Patent- und Markenamt**

**Der Präsident**

Im Auftrag

Agurks

Aktenzeichen: 199 23 614.3

## 1. Stand der Technik

Für den fernen Infrarotbereich werden z. Z. Moleküllaser, die mit CO<sub>2</sub>-Lasern gepumpt werden, eingesetzt. Im Wellenlängenbereich von 3mm bis 30µm (100GHz bis 10THz) liegen viele der für Spektroskopie von Molekülen und Festkörpern interessierenden Frequenzen und Wellenlängen. Der Einsatz einer Onchip auf dem Wafer realisierten Mikrostrahlungsquelle für diesen Bereich der Terahertz-Strahlung mit ausreichender Ausgangsleistung im Bereich zwischen 1 mW und 1 W ist von hoher technischer Bedeutung für spektroskopische Anwendungen in allen Fragen des Umweltschutzes, der Analytik und der Materialcharakterisierung in Medizin und Biologie. Solche Quellen werden z. Z. als Smith-Purcell Strahlungsquelle, eine Form der „freie Elektronenlaser“, aus makroskopischen Elektronenquellen und Beugungsgittern mit 100 bis 300 µm Periode aufgebaut und auf diese Weise ein kohärentes Strahlungsfeld mit polarisierter Strahlung mit bis zu 1 µW Leistung erreicht. Ein miniaturisierter freier Elektronenlaser hingegen stellt eine wesentlich interessantere, leistungsfähige Quelle für analytische Anwendungen dar und ist Ziel der Anmeldung.

## 2. Neuerung

Durch das Verfahren der additiven Nanolithografie können Feldelektronenquellen hoher Emittanz realisiert werden. Durch zusätzliche miniaturisierte elektronenoptische Elemente wie Beschleunigungsgitter, Fokussierungslinsen, Strahlablenker und freistehende metallische Stäbe kann nun in Zusammenfügung der Komponenten ein miniaturisierter freier Elektronenlaser auf einer Fläche von wenigen 100 Quadratmikrometern bis 10 mm<sup>2</sup> aufgebaut werden. Die Elektronenquelle hat die Charakteristik, bei 30 V Elektronen zu emittieren, die dann eine Energie von 30 Elektronenvolt besitzen. Durch Nanolithografie ist es möglich, die zweite charakteristische Komponente der Fokussierung und Strahlführung dieses Elektronenstrahls parallel zur Oberfläche in einem endlichen Abstand von der dritten Komponente, einem metallischen Gitter, zu führen. Die Höhenlage des Strahls über dem metallischen Gitter kann ebenfalls durch Ablenkspannungen eingestellt werden, die an mikrominiaturisierte Ablenkplatten bzw. an Drahtlinsen angelegt werden, hier ein früheres Patent der Anmelderin. Das möglichst bis zu 1 mm lange Beugungsgitter, ein Metallgitter mit einer Gitterkonstante im Bereich 0,1 mm bis 0,1 µm, kann durch konventionelle Lithografie bei der Herstellung der elektrischen Anschlußstrukturen zur Versorgung der Feldelektronenquelle erzeugt werden bzw. durch Elektronenstrahlolithografie mit höchster Auflösung definiert werden. Mit Vorteil wird eine hochauflösende Doppellacktechnik und Liftoff angewandt. Die Neuerung in der Patentanmeldung besteht darin, daß durch den Einsatz einer neuartigen Technologie die Integration der Elektronenquelle, die Strahlführung und die Erzeugung der Ferninfrarotstrahlung durch den Flug der schnellen Elektronen über das Beugungsgitter hinweg erzielt wird. Dabei werden bei standardmäßigen Quellen bei ca. 20.000 V Beschleunigungsspannung und einem Elektronenstrahl von 20 µm Durchmesser über einem Gitter von 100 bis 300 µm Periode eine Infrarotstrahlung im fernen Infrarot zwischen 100 µm und 1 mm Wellenlänge erzielt. Diese Strahlung entsteht durch die beim Vorbeiflug der Elektronen erzeugte wechselnde Polarisationsaufladung der Gitterstäbe. Durch die wechselnde Aufladung entsteht ein schwingender Dipol, dessen Ladungen längs des Gitters in kohärenter Weise mitgeführt werden. Dies erfolgt durch die Coulomb-Wechselwirkung der einzelnen Ladungen auf den Drähten. Damit schwingt entsprechend der einzelnen Ladungen der Stäbe das gesamte elektrische Feld kohärent. Auf diese Weise wird längs des ganzen Gitters

kohärente elektromagnetische Strahlung abgestrahlt. Ihr Energietransfer erfolgt nahezu verlustlos aus dem Elektronenstrahl in die elektromagnetische Strahlung. Die Polarisation erfordert natürlich einen gewissen Verschiebestrom und damit eine gewisse Leistung, aber diese wird voll direkt dem Strahl entzogen und auf diese Weise wird die schwingende Dipolladungskette erzeugt. Neuartig ist die auf einem Chip integrierte Führung der Elektronen und die direkte Kopplung an das Gitter mit hoher örtlicher Auflösung im Herstellungsprozeß, ebenso die durch die Miniaturisierung möglich werdende Verwendung niederenergetischer Elektronen mit Energien zwischen 10 und 1000 eV. Es ist auch möglich, bis 10 kV Elektronen auf dem Chip zu erzeugen und die Führung durch miniaturisierte elektronenoptische Bauelemente wie Mikrolinsen und Ablenkelemente zu realisieren. Bei der Verwendung derart energiereicher Elektronen ist auch die Erzeugung von Strahlung bei kurzen Wellenlängen vom mittleren Infraroten bis zum sichtbaren Spektralbereich möglich. Durch Fertigung auf dem gemeinsamen Substrat ist die direkte Ankopplung an das Gitter auf kürzester Strecke zur Quelle und die Herstellung des Gitters und der Quelle auf dem selben Chip gewährleistet. Dadurch wird der Strahlengang der Elektrodenanordnung, der im herkömmlichen Ausführungsfall bis zu 1 m beträgt, auf unter 1 mm - 10 mm Länge reduziert und eine sehr hochkohärente und lokale Lichtquelle erzeugt, was der zeitlichen und der räumlichen Kohärenz der Strahlung zugute kommt. Durch die starke Verkürzung des gesamten Elektronenweges ist es nicht mehr erforderlich, Höchstvakuum oder Hochvakuum im Strahlraum zu besitzen. Es ist ausreichend, in einer Flipchip-Bondtechnik das System durch ein in Silizium geätztes Fenster abzudecken, das durch eine durchgehende Membran von  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$  geschlossen ist, die den Hohlraum ermöglicht. Das bis zu 10  $\mu\text{m}$  hohe Bauelement ist in dem Hohlraum leicht unterzubringen. Typischerweise ätzt man in Siliziumwafer von 250  $\mu\text{m}$  Dicke Fenster von einigen Millimetern Durchmesser, die durch eine Membran mit einer Dicke von 10  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$  abgeschlossen sind. Auf diese Weise ist eine stabile mechanische Kapselung des miniaturisierten Bauelements möglich. Es kann aber auch in mikromechanischer Weise mit mm Dimensionen gefertigt werden. Das erforderliche Vakuum beträgt ca. 0,01 Torr. In diesem Fall ist dann die mittlere freie Weglänge der Elektronen in diesem Gas verminderten Drucks so groß wie die Strahllänge des miniaturisierten Bauelements. Auf diese Weise ist keine Pumpenanordnung mehr erforderlich. Das Bauelement kann als gefertigtes abgeschlossenes Element abgepackt und angeschlossen werden. Es ist auf diese Weise möglich, On-chip eine Terahertzstrahlungsquelle, d. h. eine Millimeter- und Submillimeterstrahlungsquelle zu erzeugen, die durch entsprechende Wellenführung an weiterführende Anwendungen angeschlossen werden kann.

Die Anordnung wird durch die 3 anliegenden Figuren beschrieben.

Figur 1: Schematische Darstellung des Elektrodenaufbaus für den miniaturisierten Freien Elektronen Laser von oben und von der Seite.

Figur 2: Durch Kapselung mit einer Silizium-Membranstruktur kann das erforderliche Vakuum zum Betrieb des Lasers aufrechterhalten werden. Die emittierte Laser-THz- Strahlung wird durch das Membranfenster nach außen gestrahlt.

Figur 3: Zweikammer-Membranabdeckung des miniaturisierten freien Elektronenlasers ermöglicht den Einbau einer Getterschicht in der benachbarten Kammer für die dauerhafte Aufrechterhaltung des Vakuums.

# Ansprüche

## Anspruch 1

Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle basierend auf dem Smith-Purcell-Effekt, bei welchem aus einer fokussierten Elektronenquelle ein energiereiches Bündel von Elektronen in einem definierten Abstand über ein Metallgitter aus querstehenden Gitterstegen gesandt wird, so daß durch alternierende Polarisation der Stege elektromagnetische Wellen einer Wellenlänge ausgesandt wird, welche durch die Periodizität der Stege und die Elektronengeschwindigkeit einstellbar ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Elektronenquelle, die Fokussierung des Elektronenstrahls und die Anordnung zur Strahlenablenkung in horizontaler und vertikaler Richtung, sowie das Metallgitter mit unterlegtem Reflektor in Mix- und Match-Technik durch additive Nanolithografie auf durch Elektronenstrahl- oder optische Lithographie vorgefertigten Metall-Leiterbahn-Ausschlußstrukturen mit integrierten Gitterstrukturen auf isolierendem Substrat mit THz-Reflektorunterlage im Gitterbereich integriert aufgebaut wird und in einer Technologie, die für THz Strahlung transparent ist, vakuumdicht gekapselt wird mit der Wirkung, daß der aus der integrierten Elektronenquelle austretende Elektronenstrahl durch miniaturisierte Drahtlinsen fokussiert und durch integrierte Ablenkplatten relativ zur Lage der Gitter geführt und positioniert werden kann, wodurch Terahertzstrahlung erzeugt wird, deren Intensität und Wellenlänge variiert und selektiert werden kann.

## Anspruch 2

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 **dadurch gekennzeichnet**, daß als Feldelektronenquelle ein durch additive Nanolithografie aufgebaute Draht aus gut leitfähigem Material mit stabilisierendem Vorschaltwiderstand so ausgeführt ist, daß der Elektronenstrahl parallel zur Oberfläche austritt. Das bedeutet, der Draht wird durch rechnergesteuerte Depositions-Lithographie in einer bogenförmigen Ausführung frei über der Oberfläche der Leiterbahnstruktur endend hergestellt.

## Anspruch 3

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle **dadurch gekennzeichnet**, daß die Feldelektronenquelle punktförmig ausgeführt ist, und auf ihre Spitze durch additive Nanolithografie ein Material mit niedriger Austrittsarbeit aufgebracht ist, das schon bei relativ niedrigen Spannungen Elektronen emittiert.

## Anspruch 4

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle **dadurch gekennzeichnet**, daß hinter die Feldelektronenquelle ein Beschleunigungsgitter, ausgeführt in Form einer freistehenden Elektrode aus zwei Zylinderstäben oder einem stehenden Drahting, angebracht ist, das dazu dient, die Elektronen zu beschleunigen und sie in nachfolgende runde Multipol- oder Zylinderlinsen zu führen, so daß sich der Elektronenstrahl über das nachfolgende Beugungsgitter in homogenem Abstand zur Oberfläche ausbreitet.

## Anspruch 5

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle **dadurch gekennzeichnet**, daß auf die Fokussierungs- und Strahlführungslinsen, die durch additive Nanolithografie auf der durch Elektronenstrahlolithografie oder optische Lithografie hergestellten Metallanschlußstruktur realisiert werden, ein in dieser Technik hergestelltes und ca. 1 mm bis 1 cm langes Beugungsgitter mit Gitterperioden zwischen 0,5 und 10  $\mu\text{m}$ , je nach Wellenlänge der auszusendenden Terahertzstrahlung, folgt

#### Anspruch 6

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 5 **dadurch gekennzeichnet**, daß mehrere elektrisch getrennte Beugungsgitter nebeneinander angeordnet sind und diese durch Selektion verschiedener Quellen aktiviert werden können, was zur Auswahl verschiedener emittierter Wellenlängen dient.

#### Anspruch 7

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 6 **dadurch gekennzeichnet**, daß auf dem Chip neben dem Smith-Purcell-Element auch durch eine Elektrode aktivierbare Ionengettermaterialien angebracht sind, die später zum Auspumpen der gebondeten und gekapselten Struktur eingesetzt werden.

#### Anspruch 8

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 7 **dadurch gekennzeichnet**, daß die Strahlung der Elektronenquelle durch eine Regelschaltung konstant gehalten wird und daß der das Gitter überfliegende Strahl auf einer Anodenelektrode gesammelt wird.

#### Anspruch 9

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 8 **dadurch gekennzeichnet**, daß zwischen Elektrode und Anode ein Feld angelegt wird, mit dem die Elektronengeschwindigkeit längs des Gitters langsam verändert werden kann, was zur Feineinstellung der Wellenlänge bzw. zur Erzeugung eines Frequenzspektrums dient.

#### Anspruch 10

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 9 **dadurch gekennzeichnet**, daß der auf dem Chip aufgebaute Strahler aus Feldemissionsquelle, Optik, Gitter und Anode durch ein in Silizium-Membrantechnik geätztes Fenster abgedeckt wird und in einem Vakuumsystem vor dem Bonden auf einen Druck von  $10^{-4}$  Torr evakuiert wird, der für 1 mm mittlerer freie Weglänge ausreicht, und daß der Hohlraum anschließend im Vakuum durch thermisches Bonden, ohne die Spannungszuführung kurz zu schließen, verschlossen wird.

#### Anspruch 11

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 10 **dadurch gekennzeichnet**, daß in diesem Fenster bzw. einem Nachbarfenster, das mit dem ersten Fenster in Verbindung steht, die Getterpumpe mit ihrem Material durch einmalige Aktivierung durch Stromdurchgang in Betrieb gesetzt wird und das Gesamtvolumen auf diese Weise auf den erforderlichen Arbeitsdruck gebracht wird.

#### Anspruch 12

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 11 **dadurch gekennzeichnet**, daß das Bauelement in jedweder Lage als modular verfügbare THz-Strahlungsquelle eingesetzt werden kann.

#### Anspruch 13

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 12 **dadurch gekennzeichnet**, daß die Membranfenster in dem Abdeckchip durch zusätzlich aufgebrachte Schichten reflexionsvermindernd behandelt sind, so daß für den Frequenzbereich der emittierten Strahlung eine maximale Transmission durch das Fenster erreicht wird.

#### Anspruch 14

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 13 **dadurch gekennzeichnet**, daß unter dem Gitterbereich ein THz-Strahlungsreflektor in Form einer Metallschicht oder Anordnung von Gitterstäben mit definiertem Abstand geeigneter Periode aus magnetischen oder unmagnetischen Materialien angeordnet ist, so daß die THz-Strahlung, welche das Gitter in Substratrichtung verläßt, mit höchstmöglichem Reflektionsgrad durch das Gitter zurückgesandt wird und so die Intensität der abgesandten Strahlung verstärkt wird.

#### Anspruch 15

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 14 **dadurch gekennzeichnet**, daß durch Strahlführung über dem Gitter mit definiertem Abstand die Intensität der Quelle variiert werden kann, d. h. daß durch Einsatz eines zusätzlichen Ablenkelementes vor dem Gitter die abgestrahlte Intensität bei Anlegen einer Wechselspannung an diesem Ablenkelement moduliert werden kann. Auf diese Weise kann die Strahlung für spektroskopische Zwecke für Lock-In-Meßtechniken schon gleich moduliert erzeugt werden. Dieselbe Lock-In-Modulation ist auch durch die Modulation der Extraktionsspannung an der Feldemitterspitze möglich.

#### Anspruch 16

Miniaturisierte Terahertzstrahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 15 **dadurch gekennzeichnet**, daß die Quelle um einen auf einer darüberliegenden Fläche aufgebauten Monochromator in Form einer für diesen Bereich wirksamen Nanometer- bzw. Mikrometerstruktur ergänzt wird, so daß Strahlen, die mit unterschiedlicher Wellenlänge erzeugt werden können, die Quelle in unterschiedliche Richtungen verlassen. Auf diese Weise kann durch Umschalten der Elektronenenergie, was im elektrostatischen System nach dem elektrostatischen Prinzip immer dieselbe Fokussierung, und damit gleichbleibende Betriebsbedingungen ergibt, Strahlung unterschiedlicher Frequenz erzeugt werden und die Quelle auf diese Weise für verschiedenartige Anwendungen elektrisch durchgestimmt werden.

#### Anspruch 17

Miniaturisierte Terahertz- Strahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 16 **dadurch gekennzeichnet**, daß zwischen Fokussierungslinse und dem Ende des Gitters ein elektrisches Feld angelegt wird, indem am Ende des Gitters eine zusätzliche Elektrode aufgeführt ist, welche durch die angelegte Spannung die fliegenden Elektronen beschleunigen bzw. abbremsen kann. Auf diese Weise ist es möglich, den Energieverlust der Elektronen, der beim Vorbeiflug am Gitter auftritt, auszugleichen.

#### Anspruch 18

Miniaturisierte Terahertz- Strahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 17 **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gitter über welches der Elektronenstrahl fliegt, in Bereiche, die parallel zur Strahlrichtung liegen, unterteilt ist, in welchen unterschiedliche Gitterkonstanten realisiert sind. Durch elektrostatische Strahlführung, bzw. durch Verwendung mehrerer Elektronenquellen, von denen je eine dem einzelnen Bereich zugeordnet ist, kann auf diese Weise die emittierte Strahlung in ihrer Wellenlänge umgeschaltet werden.

#### Anspruch 19

Miniaturisierte Terahertz- Strahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 18 **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gitter in seiner Gitterkonstante quer zur Strahlrichtung variiert, so daß Ablenkfelder oder das Gitter insgesamt umschließende Ablenkplatten, die hinter der Fokussierungslinse ausgeführt sind, die Strahlführung über dem Gitter so verändert werden kann, daß ein Bereich

einer anderen Gitterkonstante zur Emission der Wellenlänge der Strahlung ausgewählt wird. Wenn das Gitter als "chirped grating", d. h. Gitter mit variabler Gitterkonstante, ausgeführt ist, ist eine Einstellung der Wellenlänge in kontinuierlicher Weise möglich.

#### Anspruch 20

Miniaturisierte Terahertz- Strahlungsquelle nach Anspruch 1 bis 19 **dadurch gekennzeichnet**, daß die Intensitätssteuerung erfolgt, indem unter und über dem Gitter eine für THz strahlung transparente elektrostatische Platte angebracht ist, mit welcher im gesamten Gitterbereich die Lage des Strahls variiert werden kann und auf diese Weise die Intensität örtlich selektiert werden kann. Dies wird mit Vorteil dadurch erreicht, daß diese elektrostatischen Platten mit unterschiedliche Potentiale besitzenden Bereichen ausgeführt sind, d. h. daß Streifen aufgeführt sind, die getrennt eingestellt werden können.

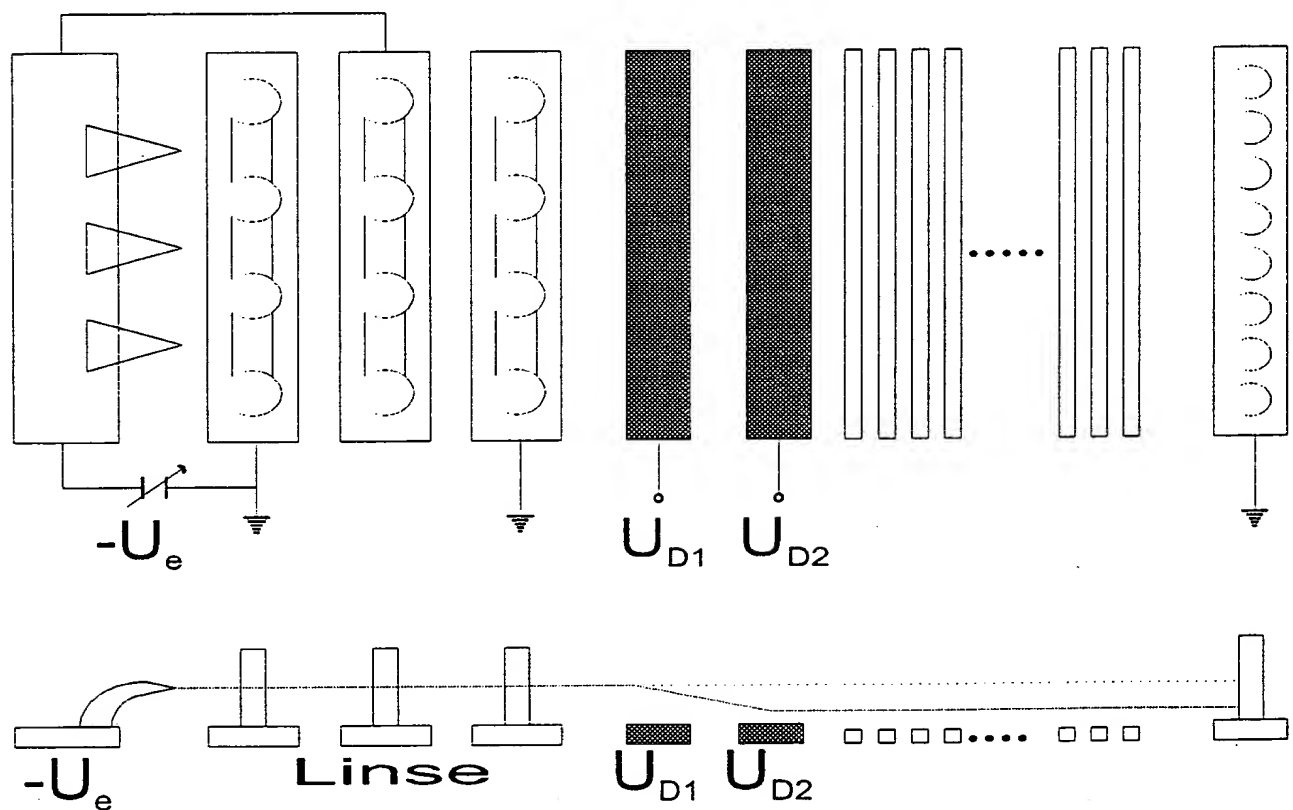


Fig.1

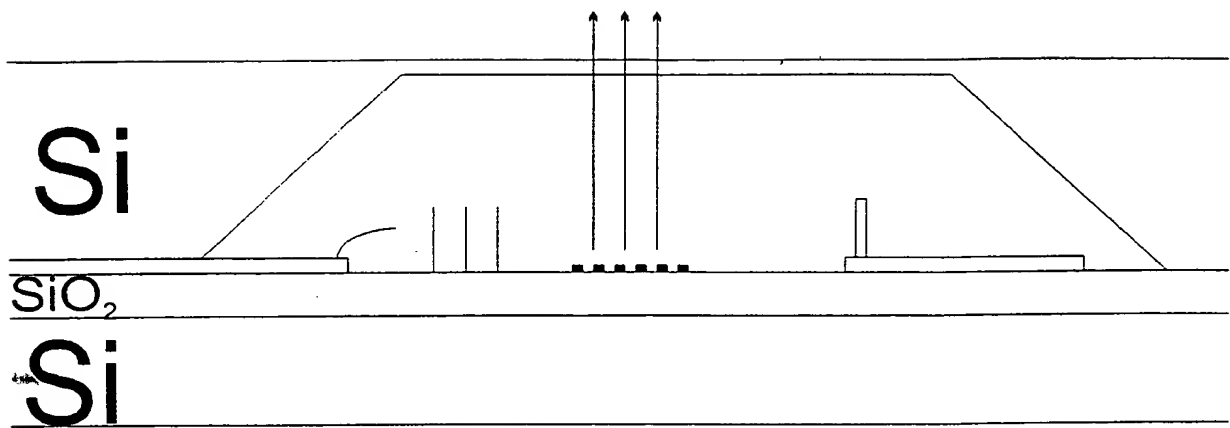


Fig.2

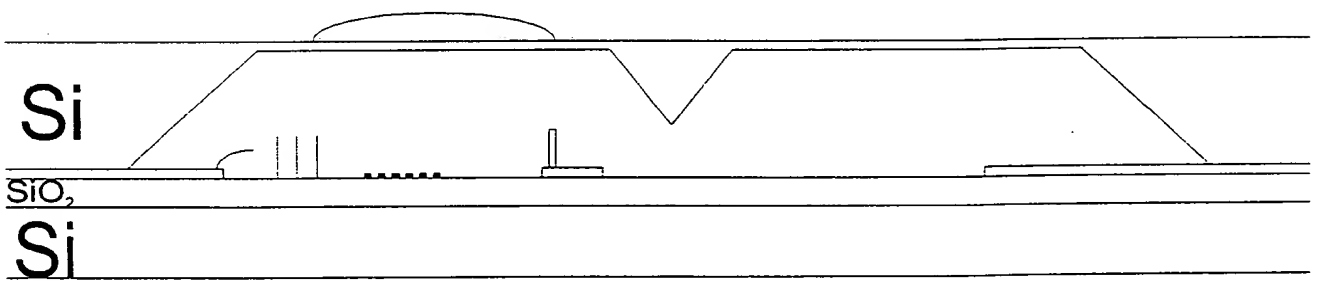


Fig.3